

# 基于预装配精度分析的飞机关键 装配工序质量控制技术

张 敏,田锡天,耿俊浩,刘桂林,刘殷杰,李五朋

(西北工业大学机电学院,西安 710072)

**[摘要]** 针对大型飞机机身部件装配过程中经常出现装配精度超差造成的装配返工、返修现象,提出基于预装配精度分析的飞机关键装配工序质量控制技术。首先,对零部件或在制装配件的关键特性点实际坐标信息进行预处理,包括坐标系转换、数据补偿、数据整合与格式转换;其次,基于装配工艺和实测数据,建立基于实测数据的装配工序精度模型,进行预装配精度分析。最后,以某型飞机中机身壁板装配为例,采用激光跟踪仪获得关键控制特性点的三维坐标实测信息,将处理后的实测数据作为装配精度预测模型的输入偏差进行预装配精度分析,实现了中机身壁板的质量控制。

**关键词:** 预装配;关键控制特性点;装配精度分析;关键装配工序;质量控制

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2019.05.051



张 敏

博士研究生,主要研究方向为工艺过程仿真与优化、制造信息化。

飞机装配过程是一个复杂的过程,与一般的机械产品相比,飞机装配过程中包含大量的零件、部件、工装夹具和设备等制造资源,具有复杂的协调关系、工作量大、装配周期长

等特点,尤其对装配质量要求极其严格<sup>[1-2]</sup>。

飞机装配以工序为装配基本单元,工序质量的控制是保证飞机装配过程质量及最终产品质量的关键。飞机装配工序分为关键工序和非关键工序,其中关键装配工序是指对最终产品质量有直接影响的装配工序及装配过程中产生问题较多的工序。如果不能对装配现场关键装配工序质量加以控制,很难保证装配质量的稳定性。飞机部件装配精度在很大程度上决定了飞机的装配质量<sup>[3]</sup>。目前,主要通过装配工艺准备阶段的装配精度分析与控制,保证产品精度。但是,对于大型飞机机身部件的装配过程,由于部件尺寸大、刚度低、制造偏差<sup>[4]</sup>及装配偏差的累积<sup>[5-6]</sup>等原因,导致现场实际装配过程中易出现装配精度超差的质量问题。目前,对于实际装配过程中的精度超差

问题多半通过工人经验进行修配、调整及反复试装解决,导致了生产周期长、装配成本高。

预装配是指通过提取零件的实际数据,在实测数据的基础上进行装配仿真的方法,能够解决传统数字化装配中无法预测实际装配干涉情况、无法进行装配质量预评估等问题<sup>[7]</sup>。罗振伟等<sup>[7-8]</sup>提出了基于点云数据装配干涉检测和修改模型预装配干涉检测两种预装配技术。基于点云数据装配干涉检测是按装配理论模型中的测量点的理论位置,对预处理点云进行位置匹配,通过对装配点云数据进行质检完成装配质量预评估。基于修改模型的装配检测是通过对点云数据分析,获取关键尺寸的数据并修改零件模型,然后通过装配仿真实现装配质量的预评估。张薇<sup>[9]</sup>通过零件外形的实测点云数据,将点云模型上用于装配的特征进行反求重构,

实现了虚拟装配后的装配质量评估。

综上,目前预装配方法主要是通过点对云数据进行干涉检测、修改模型或者重构模型进行虚拟装配仿真实现装配质量的预评估,在一定程度上减少了试装的次数,节约了装配时间和成本,但是对于尺寸较大的零部件,存在点云数据量大、计算效率低、模型重构复杂等问题,而且无法反映实际装配偏差传递关系。因此,本文提出基于预装配精度分析的飞机关键装配工序质量控制技术。首先,通过数字化测量设备提取零件或者在制装配件关键控制特性点的实际坐标信息并进行预处理。然后,建立基于实测数据的装配工序精度模型进行预装配精度分析,实现飞机关键装配工序质量的评估,达到控制飞机装配质量的目的。最后,以某型飞机中机身壁板装配为例,实现了中机身壁板的质量控制。

### 基于预装配精度分析的飞机关键装配工序质量控制方法

基于预装配精度分析的飞机关键装配工序质量控制是指针对关键装配工序,采用数字化测量设备对待装零组件以及前道工序已完成的在制装配件的关键特性点的坐标信息进行测量与预处理,基于分析处理后的实测数据,建立基于实测数据的装配工序精度模型,进行预装配精度分析,在此基础上制定装配指导建议并反馈给装配现场,指导生产现场的实际装配工序操作,达到控制飞机装配质量的目的。控制方法如图1所示。

#### 1 数字化点位测量

在飞机装配过程中,经常需要将工装和零部件上的某些特征点作为定位基准或质量评价要素,这些特征点就是关键控制特性点(KCCPs)<sup>[10]</sup>。通常,定位特征一般选择主要结构件的K孔、交点孔、叉耳端面等,这些都是飞机装配过程中的关键控制特征点。虽然这些关键控制特征点的

测量精度要求较高,但是其几何要素比较简单,通常非常易于测量。目前应用于飞机装配过程中的数字化点位测量技术包括激光雷达、激光跟踪测量和空间定位测量等<sup>[11]</sup>。

#### 2 关键控制特性点实测数据预处理

通过数字化点位测量技术可以获得零部件关键特性点的坐标信息,但是在数据采集过程中存在测量坐标系与装配坐标系不一致、测量误差及数据文件格式等问题,需要基于测量原理,对采集的数据进行预处理,作为预装配精度分析的数据来源。

#### 3 预装配精度分析

预装配精度分析是在关键装配工序执行前,基于处理后的关键控制特性点的实测数据,建立基于实测数据的装配工序精度模型,对待装配的关键工序进行装配精度计算,并针对计算结果分析影响装配精度的因素,以此作为装配方案调整的依据。

#### 4 装配方案调整及装配指导建议

根据预装配精度分析结果,评估当前装配件在实际装配中是否会发生装配精度超差现象。预测结果满足精度要求时,现场直接进行装配工序执行。不满足精度要求时,通过装调优化控制装配精度,直到预装配精度分析结果满足要求,最后形成装配指导建议,反馈到装配现场指导现场

装配工序执行,实现对飞机关键装配工序质量的控制。

基于预装配精度分析的飞机关键装配工序质量控制涉及数字化点位测量、关键控制特性点实测数据预处理、预装配精度分析、装配方案优化调整等多项技术,本文主要针对关键控制特性点实测数据预处理和预装配精度分析这两方面进行研究。

### 关键控制特性点实测数据预处理

由于激光跟踪仪测量技术具有精度高、测量范围大、转站方便、操作简单等优点,在国内外航空制造企业应用广泛。因此,本文采用激光跟踪仪进行点位测量,所获得的关键控制特性点实测数据预处理过程如图2所示。

#### 1 数据准备

基于实测数据的预装配精度分析与装配工艺准备阶段的装配精度分析都是对装配精度的分析,不同之处在于数据的来源不同。装配工艺准备阶段的装配精度分析是在关键控制特性点设计公差的基础上,对装配精度进行预测。而基于实测数据的预装配精度分析是在关键控制特性点的实测数据基础上,确定待装配关键工序的装配精度。因此,在进行预装配精度分析时,将在工艺设计阶

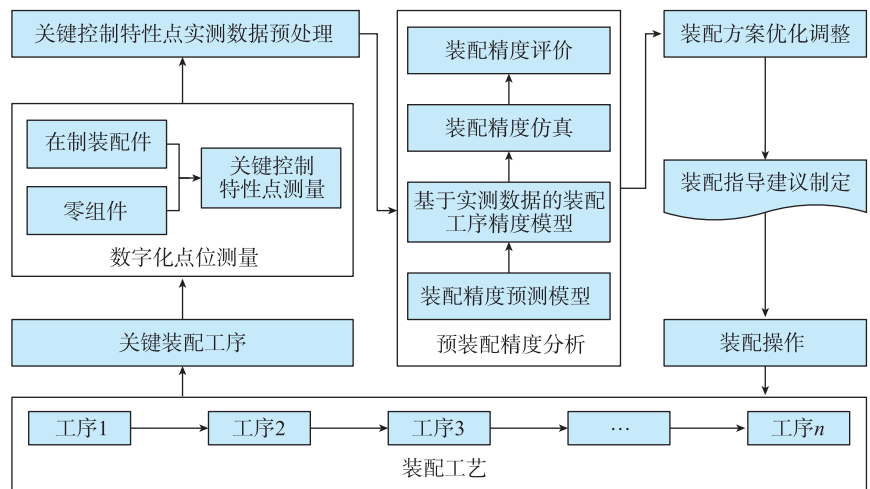


图1 飞机关键装配工序质量控制方法

Fig.1 Quality control method for key assembly procedure of aircraft

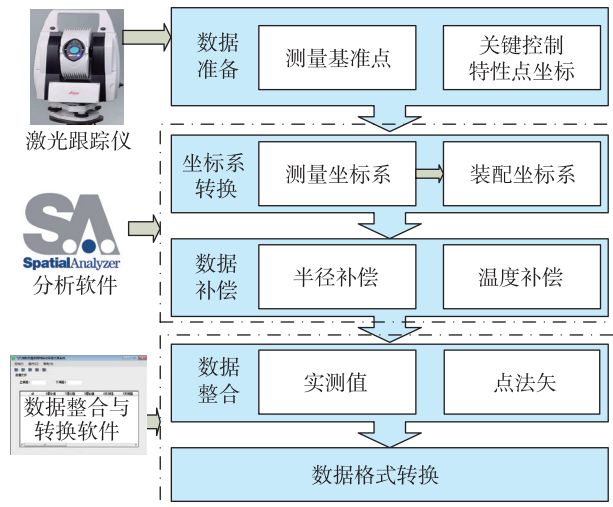


图2 实测数据预处理

Fig.2 Process of measured data preprocessing

段精度分析中定义的关键控制特性点作为测量内容。同时,工艺设计阶段定义的测量公共基准点用于后续数据处理。

## 2 坐标系转换

由于实际测量到的关键控制特性点与公共基准点均处于测量坐标系下,为满足后续预装配精度分析需要,需要将测量坐标系下的实测值转换为飞机装配坐标系下的值。基于公共基准点在测量坐标系与飞机装配坐标系下的坐标值,通过求取旋转、平移矩阵,对关键控制特性点进行坐标旋转、平移,得到飞机装配坐标系下的关键控制特性点坐标<sup>[12]</sup>。如假设测量坐标系下坐标 $(x_m, y_m, z_m)$ 在飞机装配坐标系下对应值为 $(x_a, y_a, z_a)$ 转换关系可以表示为:

$$\begin{pmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \end{pmatrix} = \mathbf{R} \begin{pmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{pmatrix} + \mathbf{T} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{R}$ 为旋转矩阵; $\mathbf{T}$ 为平移向量。

## 3 数据补偿

通过激光跟踪仪测量获得的实测数据受到测量环境、测量方法的影响。为了提高测量精度,考虑温度补偿和半径补偿。关键控制特性点的坐标信息是激光跟踪仪测量靶球获得的,实际测量到的是靶球的球心坐标值,因此,需要在测量方向上补偿一个靶球

半径长度。为方便半径补偿计算,在装配坐标系中建立平行于装配坐标系的辅助计算坐标系,如图3所示。

激光跟踪仪中心点为 $(x_1, y_1, z_1)$ ,反射靶球点为 $(x_2, y_2, z_2)$ ,靶球半径为 $r$ ,待测点的实际坐标为 $(x_3, y_3, z_3)$ 。通过几何关系,仰角 $\alpha$ 、偏转角 $\beta$ 的三角函数表达式为:

$$\begin{cases} \sin \alpha = \frac{(z_1 - z_2)}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}} \\ \cos \alpha = \frac{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}} \\ \sin \beta = \frac{(x_2 - x_1)}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}} \\ \cos \beta = \frac{(y_2 - y_1)}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}} \end{cases} \quad (2)$$

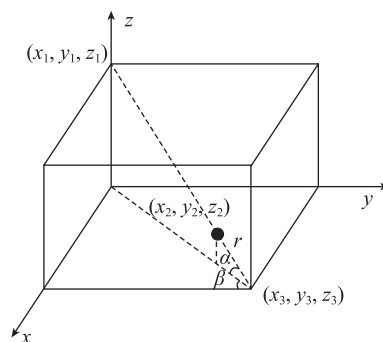


图3 半径补偿原理

Fig.3 Radius compensation principle

将式(2)代入式(3),可以得到待测点的实测坐标。

$$\begin{cases} x_3 = x_2 + r \cos \alpha \sin \beta \\ y_3 = y_2 + r \cos \alpha \cos \beta \\ z_3 = z_2 - r \sin \alpha \end{cases} \quad (3)$$

## 4 数据整合

测量数据只包含点坐标及偏差数据,缺少装配精度分析所需点的法向矢量信息,无法满足预装配分析时对测量数据的属性要求。因此,有必要提取装配精度模型中点的法向矢量信息,并与测量数据整合到一个测量文件中,形成包含点名称、实测坐标值和点的法向矢量信息的数据文件。

## 5 数据格式转换

测量数据文件本身格式单一,往往不能满足装配精度分析数据提取要求。因此,在预装配精度分析之前需要确定数据结构,按照数据结构对测量数据进行格式转换。本文中,需要将数据整合后的csv格式文件转换为xml格式的数据文件。

## 预装配精度分析

预装配精度分析过程如图4所示。针对关键装配工序,基于装配工艺建立装配精度预测模型,装配工艺包括装配顺序、定位方案等,其决定着偏差传递的路径和方向。在此基础上,将分析处理后的KCCPs实测数据作为装配精度预测模型的偏差,从而建立能够反映实际装配偏差传递关系的装配工序精度模型,进行装

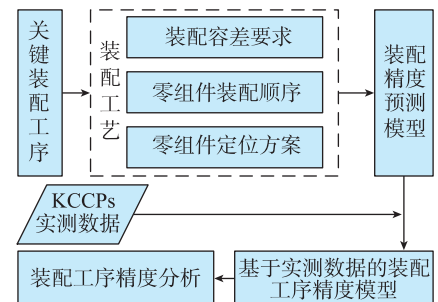


图4 预装配精度分析过程

Fig.4 Process of preassembly precision analysis

配工序精度分析。

### 1 装配精度预测模型

装配精度随着装配工艺的进行而不断累积变化,因此基于装配工艺建立装配精度预测模型,准确预测装配精度。装配工艺包括装配容差要求、零组件装配顺序、零组件定位方案等内容,其中装配容差要求是装配精度控制的目标,零组件装配顺序和定位方案决定了装配偏差传递和累积的方向。根据装配工艺,提取相关信息,构建矢量环,建立装配精度预测模型。装配容差与零组件、工装偏差的关系函数为:

$$u=f(v_1, v_2, \dots, v_n) \quad (4)$$

其中,  $u$  为装配容差;  $v_n$  为零组件或者工装偏差;  $f$  为装配容差与零组件、工装偏差之间的关系函数,具体矩阵表达式为<sup>[13]</sup>:

$$\delta U = -B^{-1} A \delta V \quad (5)$$

其中,  $\delta U$  为装配容差矢量矩阵;  $B$  是矢量环标量函数对装配容差变化的偏导数矩阵;  $A$  为矢量环标量函数对零组件或者工装偏差变化的偏导数矩阵;  $\delta V$  为零组件或者工装偏差矢量矩阵。

### 2 基于实测数据的装配工序精度模型

利用预处理后的关键控制特性点的实测数据,作为装配精度预测模型中关键控制特性点的偏差,形成基于实测数据的装配工序精度模型,此时,装配容差与零组件、工装偏差的关系函数为:

$$u'=f(v_1', v_2', \dots, v_n') \quad (6)$$

其中,  $u'$  为实测数据替换后得到的装配容差;  $v_n'$  为零组件或者工装偏差实测数据。

### 3 装配工序精度分析

基于装配工序精度模型进行装配精度计算,得到装配精度计算结果,判断装配精度计算结果是否超差。若装配精度未超差,进行下一关键装配工序精度分析;若装配精度超差,分析装配精度超差原因,

通过调整修配量大小、选择调整件及优化定位方案等方法对装配工艺进行定量调整,保证装配精度满足设计要求,最后生成装配指导建议,反馈到装配现场指导现场装配操作。

## 应用实例

以某型飞机中机身壁板装配过程为例,基于 Spatial Analyzer (SA) 及 Variation Analysis (VA) 对所提技术进行实例验证。具体精度指标如表 1 所示。

首先以理论装配精度模型中

表1 精度指标

Table 1 Precision requirement

内容	指标 /mm
蒙皮外形轮廓度	±0.5
框轴线面位置度	±1
长桁轴线面位置度	±1

定义的关键控制特性点为对象,采用激光跟踪仪获得关键控制特性点的三维坐标实测信息。在 SA 中对实测信息进行坐标系变换和数据补偿。根据靶球半径 1.5 英寸 (1in=2.54cm),经换算,补偿半径为 19.05mm。由于实际测量室温为 25°,设置最终温度为 25°,如图 5(a)(b)所示。在自主开发的“飞机装配测量数据转换与容差仿真系统”软件中进行数据整合及数据格式转换处理,如图 5(c)为整合前和整合后的实测数据。格式转换处理完成后得到的关键控制特性点的实测数据如图 5(d)所示。

然后在 VA 环境中,依据零组件装配顺序、定位基准与定位方法、关键控制特性点等信息,建立装配精度预测模型,如图 6 中左侧“树状结构”所示,再将关键工序对应的 .jt 格式的装配单元的轻量化模型与之关联。

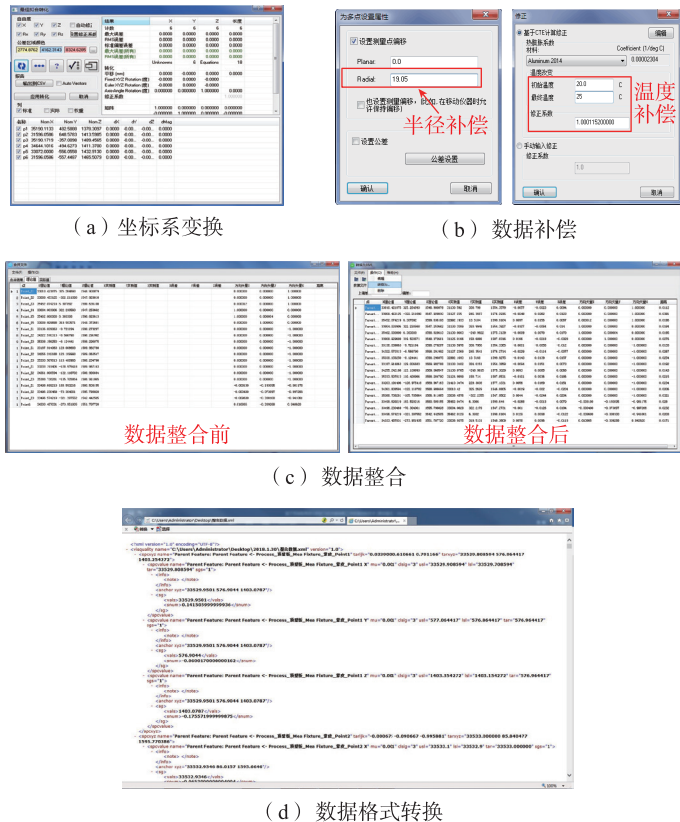


图5 实测数据预处理

将处理后的 KCCPs 实测数据作为装配精度预测模型的输入偏差,形成基于实测数据的装配工序精度模型。即针对装配工序精度模型中所有的关键特性点,依次将 KCCPs 实测坐标数据输入装配精度预测模型中,如图 7 所示。

最后在 VA 环境中进行计算,VA 软件自动提取装配工序精度模型中定义的精度信息,构建偏差传递关系,并使用 KCCPs 实测数据,计算预测目标的精度值,得到装配精度预测结果如图 8 所示。

由图 8 可以看出蒙皮测量点 1 和 3 超差,不满足设计精度要求。通过分析超差原因,发现蒙皮定位方案不合理,因此采用定位方案调整方法,对蒙皮两侧进行过定位夹紧,重新进行预装配精度计算,最终得到满足设计要求的精度预测值。最后将

预装配精度分析结果以及装配指导建议生成分析报告,如图 9 所示,反馈至现场指导装配操作,实现基于预装配精度分析的飞机关键装配工序质量控制。

### 结论

针对飞机现场实际装配时由于零部件的实际误差积累导致的装配精度超差质量问题,提出基于预装配精度分析的飞机关键装配工序质量控制技术。阐述了基于预装配精度分析的飞机关键装配工序质量控制方法,分析了实测数据预处理过程,建立了基于实测数据的装配工序精度模型,实现了现场关键装配工序的预装配精度分析。通过某型飞机中机身壁板装配的实际应用,证明该技术容易实现,并达到对装配现场关键装配工序质量控制的目的。

### 参考文献

[1] 董会波,许建新,董思洋.面向飞机装配的MES系统研究[J].航空制造技术,2010,53(18):46-50.  
 DONG Huibo, XU Jianxin, DONG Siyang. Research on manufacturing execution system for aircraft assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(18):46-50.  
 [2] YAO P T, TAN C B, ZHOU L S. Research on assembly quality evaluation for aircraft product based on monte-carlo simulation[J]. Advanced Science Letters, 2011, 4(6): 2352-2355.  
 [3] 李泷泉,黄翔,方伟,等.飞机装配中的数字化测量系统[J].航空制造技术,2010,53(23):46-48.  
 LI Shuanggao, HUANG Xiang, FANG Wei, et al. Digital measurement system for aircraft assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(23):46-48.

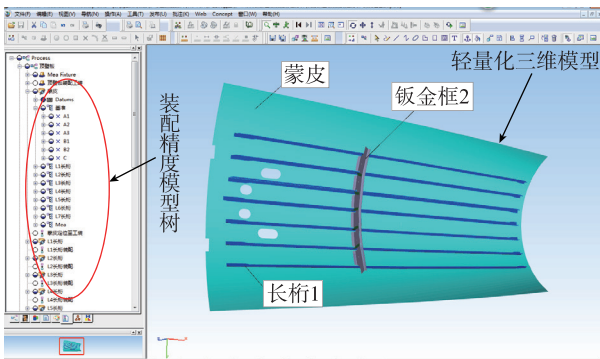


图6 装配精度预测模型  
Fig.6 Assembly precision prediction model

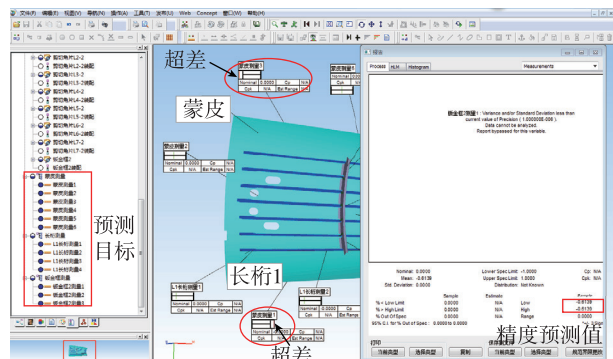


图8 装配精度预测结果  
Fig.8 Results of assembly accuracy prediction

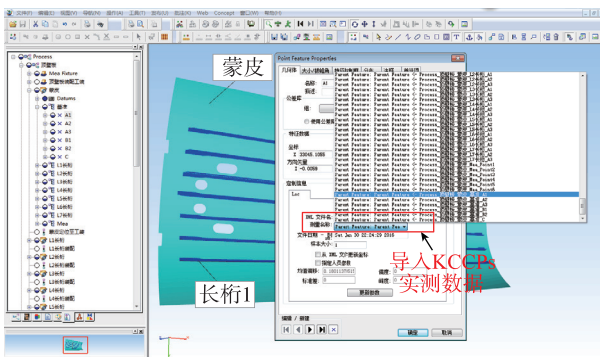


图7 实测数据导入装配精度预测模型  
Fig.7 Import measured data into assembly precision prediction model

预装配精度分析报告						
测量对象	关键控制特性点 KCCPs	公差上下限	精度仿真结果	每一项是否满足精度要求	总体是否满足精度要求	装配指导建议
蒙皮	蒙皮测量点1	±0.5	0.6889	不合格	不合格	调整定位方案,将蒙皮两侧进行过定位夹紧
	蒙皮测量点2	±0.5	-0.0633	合格		
	蒙皮测量点3	±0.5	-0.7197	不合格		
	蒙皮测量点4	±0.5	0.3342	合格		
	蒙皮测量点5	±0.5	0.0771	合格		
	蒙皮测量点6	±0.5	-0.0156	合格		
长桁	长桁测量点1	±1	-0.5927	合格	合格	无
	长桁测量点2	±1	-0.566	合格		
	长桁测量点3	±1	-0.4704	合格		
	长桁测量点4	±1	0.2245	合格		
钣金框2	钣金框2测量点1	±1	-0.6139	合格	合格	无
	钣金框2测量点2	±1	-0.7843	合格		
	钣金框2测量点3	±1	0.0469	合格		

图9 预装配精度分析报告  
Fig.9 Preassembly precision analysis report

[4] 赵东平, 田锡天, 耿俊浩. 面向机结构件装配的偏差源等效分析方法[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(4): 993-1000.

ZHAO Dongping, TIAN Xitian, GENG Junhao. Equivalent analysis method of deviation source for kinematic components assembly[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(4): 993-1000.

[5] CHENG L, WANG Q, LI J X, et al. Propagation analysis of variation for fuselage structures in multi-station aircraft assembly[J]. Assembly Automation, 2018, 38(1): 67-76.

[6] CHENG L, WANG Q, LI J X, et al. Variation modeling for fuselage structures in large aircraft digital assembly[J]. Assembly Automation, 2015, 35(2): 172-182.

[7] 罗振伟, 梅中义. 基于测量数据的飞机数字化预装配技术[J]. 航空制造技术, 2013, 56(20): 99-102.

LUO Zhenwei, MEI Zhongyi. Aircraft digital preassembly technology based on measured data[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(20): 99-102.

[8] 于海涛, 毛贝, 罗振伟. 面向飞机装配过程的数字化预装配检测系统[J]. 航空

制造技术, 2015, 58(4): 55-60.

YU Haitao, MAO Bei, LUO Zhenwei. Digital preassembly detection system for aircraft assembly process[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(4): 55-60.

[9] 张微. 基于实测数据的飞机部件数字化预装配技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.

ZHANG Wei. Research on aircraft components digital preassembly based on measured data[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.

[10] 陈哲涵, 杜福洲, 唐晓青. 基于关键测量特性的飞机装配检测数据建模研究[J]. 航空学报, 2012, 33(11): 2143-2152.

CHEN Zhehan, DU Fuzhou, TANG Xiaoqing. Key measurement characteristics based inspection data modeling for aircraft assembly[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(11): 2143-2152.

[11] 张开富. 飞机装配过程数字化测量技术[J]. 航空制造技术, 2016, 59(10): 34-40.

ZHANG Kaifu. Digital measuring technique in aircraft assembly[J]. Aeronautical

Manufacturing Technology, 2016, 59(10): 34-40.

[12] 景喜双, 张鹏飞, 王志佳, 等. 数字化组合测量辅助飞机装配质量检测技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(7): 1196-1201.

JING Xishuang, ZHANG Pengfei, WANG Zhijia, et al. Digital combined measuring technology assisted quality inspection for aircraft assembly[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(7): 1196-1201.

[13] 唐健钧, 田锡天, 耿俊浩, 等. 基于多维矢量环的装配偏差源敏感度分析[J]. 机械工程学报, 2015, 51(17): 156-161.

TANG Jianjun, TIAN Xitian, GENG Junhao, et al. Sensitivity analysis of assembly deviation source based on multidimensional vector loop[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(17): 156-161.

通讯作者: 田锡天, 博士、教授、博士生导师, 研究方向为工艺过程仿真与优化、CAPP、制造业信息化等, E-mail: tianxt@nwpu.edu.cn.

## Quality Control Technology for Key Assembly Procedure of Aircraft Based on Preassembly Precision Analysis

ZHANG Min, TIAN Xitian, GENG Junhao, LIU Guilin, LIU Yinjie, LI Wupeng  
(School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**[ABSTRACT]** Aiming at the assembly rework and repair problems caused by the poor assembly precision in assembly process of large aircraft fuselage components, the quality control technology for key assembly procedure of aircraft based on preassembly precision analysis is proposed. Firstly, the actual coordinate information of key control characteristic points (KCCPs) of components or in-process assembly parts is preprocessed, including coordinate system transformation, data compensation, data integration and format conversion. Then, according to the assembly process and measured data, an assembly procedure precision model based on measured data is established to perform the pre-assembly precision analysis. Finally, taking the fuselage panel assembly as an example, the laser tracker is used to obtain the measured information of the three-dimensional coordinates of KCCPs, and the processed data are used as the input deviation of the assembly precision prediction model for preassembly precision analysis, so as to realize the quality control of the fuselage panel.

**Keywords:** Preassembly; Key control characteristic points (KCCPs); Assembly precision analysis; Key assembly procedure; Quality control

(责编 铃兰)